

УДК 519.7.85

Е. Б. Ахиезер,

к.т.н., доц., профессор кафедры компьютерной математики и анализа данных,
Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»,
ул. Кирпичева, 2, г. Харьков, 61002, Украина
akhiezer.cmds@gmail.com
(ORCID: 0000-0002-7087-9749)

О. И. Дунаевская,

к.т.н., доцент кафедры компьютерной математики и анализа данных,
Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»,
ул. Кирпичева, 2, г. Харьков, 61002, Украина
dunaevskaya.olga.khpi@gmail.com (ORCID: 0000-0003-0286-5991)

И. В. Сердюк,

к.т.н., доцент кафедры компьютерной математики и анализа данных,
Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»,
ул. Кирпичева, 2, г. Харьков, 61002, Украина
irinaserdiuk135@gmail.com

М. А. Шишкин,

к.т.н., доц., доцент кафедры промышленной и биомедицинской электроники,
Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»,
ул. Кирпичева, 2, г. Харьков, 61002, Украина
m.shishkin1966@gmail.com (ORCID: 0000-0002-1128-9722)

О. А. Бутова,

к.т.н., доцент кафедры промышленной и биомедицинской электроники,
Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»,
ул. Кирпичева, 2, г. Харьков, 61002, Украина
cherie2812@gmail.com (ORCID: 0000-0002-2276-7259)

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ СУТОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Аннотация. Рассмотрена задача неравномерного потребления электроэнергии в течение суток. Ввиду необходимости хранения больших объемов электроэнергии в работе использованы хранилища. В результате получена трехиндексная распределительная задача линейного программирования с промежуточными центрами, которая сведена к решению двух подзадач. Предложен метод сведения распределительной задачи к транспортной.

Ключевые слова: электроэнергия, неравномерное потребление, распределительная задача, линейное программирование, трехиндексная задача, хранилища электроэнергии.

Введение. В процессе производства, передачи и потребления электроэнергии возникают потери. Они делятся на две категории: технологические и коммерческие. Технологические потери связаны с расходом электроэнергии на работу оборудования, обеспечивающего выработку и передачу электроэнергии.

Коммерческие потери в основном определяются хищениями электроэнергии, а также обусловлены инструментальными погрешностями измерений.

Технологические потери подразделяются на категории:

- нагрузочные потери в оборудовании, трансформаторах;
- потери в высокочастотных заградителях связи;
- потери холостого хода и компенсирующих устройств;
- потери в счетчиках, устройствах присоединения ВЧ – связи, изоляции в кабельных линиях;
- климатические потери (корона, утечка по изоляторам);
- тепловые потери при передаче электроэнергии по проводам на линиях электропередачи.

Представляют интерес приведенные в [1-3] данные о распределении величины потерь по категориям.

Тепловые потери в линиях составляют в среднем 37% от величины суммарных технологических потерь, потери в обмотках трансформаторов – 26%, потери в стали трансформаторов – 24%, другие потери – 13%.

Следует отметить, что перечисленные виды потерь, кроме потерь на линиях электропередачи, никак не связаны с тем, каков характер распределения электроэнергии по потребителям. Это обстоятельство делает актуальной задачу рационального распределения суммарной вырабатываемой электроэнергии. Рассмотрим следующий важный отдельный случай этой сложной задачи.

Постановка задачи. При передаче электроэнергии возникает проблема в связи с крайне неравномерным потреблением электроэнергии в течение суток. При этом, поскольку остановка агрегатов генерации электроэнергии приводит к существенным потерям, вырабатываемую энергию необходимо хранить [12].

Известны и применяются несколько способов решения этой задачи. Ввиду необходимости хранения больших объемов электроэнергии применение аккумуляторных батарей неэффективно. Простой и надежный способ хранения электроэнергии состоит в использовании гидроаккумулирующих электростанций (ГАЭС). Такая станция содержит объемные резервуары для воды на нижнем и верхнем уровнях. Во время минимума энергопотребления ГАЭС получает из сети электроэнергию, которая расходуется на перекачку воды из нижнего резервуара в верхний. Во время максимума потребления вода сбрасывается из верхних резервуаров в нижние, приводя в действие электрогенераторы. Другая возможность хранения электроэнергии – использование системы складов-холодильников. В период низкого потребления энергия расходуется на понижение температуры в системе холодильников, например, на 1°C ниже нормы. В период высокого потребления эти холодильники отключаются до тех пор, пока повышающаяся температура достигнет нормы. В настоящее время рассматривается еще несколько вариантов устройств для хранения электроэнергии (например, сжижение воздуха или других газов), но они не предназначены для использования в промышленных масштабах.

Задача управления процессами транспортировки электроэнергии от её источников к хранилищам и от хранилищ к потребителям должна решаться с учетом потерь на нагревание проводов. Величина потерь определяется по закону Джоуля-Ленца и пропорциональна квадрату тока, протекающего в проводах. Снижение потерь достигается уменьшением тока в линии электропередачи за счет повышения напряжения. При этом необходимо учитывать и сопротивление, которое пропорционально длине провода, а также потери при хранении. Эти обстоятельства делают задачу управления процессами передачи электроэнергии от производителей к потребителям нетривиальной [9].

Построим формальную модель задачи.

Введем

P_i – мощность электроэнергии, отдаваемая i -й электростанцией, $i = 1, 2, \dots, m$;

\hat{B}_j – потенциальная емкость j -го хранилища электроэнергии, $j = 1, 2, \dots, n$;

C_k – потребность в электроэнергии k -го потребителя, $k = 1, 2, \dots, p$;

R_{ij} – суммарное сопротивление проводов линии электропередачи между i -м источником электроэнергии и j -м хранилищем;

X_{ij} – продолжительность передачи электроэнергии от i -го источника к j -му хранилищу;

V_{ij} – напряжение на линии электропередачи между i -м источником и j -м хранилищем;

R_{jk} – суммарное сопротивление проводов между j -м хранилищем и k -м потребителем;

V_{ik} – напряжение на линии электропередачи между j -м хранилищем и k -м потребителем;

X_{ik} – продолжительность передачи электроэнергии от j -го хранилища к k -му потребителю.

При этом суммарный объем электроэнергии, передаваемой от всех источников к j -му хранилищу, равен $\sum_{i=1}^m P_i X_{ij}$. Естественное ограничение для этой величины имеет вид

$$\hat{B}_j = \sum_{i=1}^m P_i X_{ij} \leq B_j, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

Величина потерь при передаче электроэнергии от i -го источника к j -му хранилищу определяется соотношением

$$S_{ij} = I_{ij}^2 R_{ij} X_{ij} = a \left(\frac{P_i}{V_{ij}} \right)^2 R_{ij} X_{ij} = C_{ij} X_{ij}, \quad (2)$$

где a – масштабирующий коэффициент.

Аналогичным выражением описывается величина S_{jk} потерь при передаче электроэнергии от j -го хранилища к k -му потребителю.

На переменные X_{ij} накладываются дополнительные ограничения на общую продолжительность отбора электроэнергии в каждом источнике для хранения

$$\sum_{j=1}^n X_{ij} = T_i, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad (3)$$

$$X_{ij} \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad j = 1, 2, \dots, n,$$

Суммарные потери электроэнергии при ее передаче от источников к хранилищам равны

$$S_1 = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n S_{ij} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n C_{ij} X_{ij}. \quad (4)$$

Введем r_j – коэффициент полезного действия j -го хранилища и \hat{T}_j – время, в течение которого j -е хранилище расходует накопленную электроэнергию, $j = 1, 2, \dots, n$. Тогда мощность электроэнергии, отдаваемой j -м хранилищем потребителям

$$\hat{P}_j = r_j \frac{\hat{B}_j}{\hat{T}_j}, \quad j = 1, 2, \dots, n. \quad (5)$$

При этом объем электроэнергии, передаваемой от j -го хранилища k -му потребителю, равен $\hat{P}_j X_{jk}$, а суммарный объем, передаваемый k -му потребителю, равен $\sum_{j=1}^n \hat{P}_j X_{jk}$. Естественные ограничения для этой величины имеют вид:

$$\hat{C}_k = \sum_{j=1}^n \hat{P}_j X_{jk} \leq C_k, \quad k = 1, 2, \dots, p. \quad (6)$$

Тогда величина потерь при передаче электроэнергии от j -го хранилища k -му потребителю равна $C_{jk}X_{jk}$, а суммарные потери при передаче от хранилищ потребителям равны

$$S_2 = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^p C_{jk} X_{jk} \quad (7)$$

Дополнительные ограничения на переменные X_{jk} имеют вид

$$\sum_{k=1}^p X_{jk} = \hat{T}_j, \quad j = 1, 2, \dots, n, \quad (8)$$

$$X_{jk} \geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, n, \quad k = 1, 2, \dots, p.$$

Величина суммарных потерь при передаче электроэнергии от источников к потребителям равна

$$S = S_1 + S_2 = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n C_{ij} X_{ij} + \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^p C_{jk} X_{jk} \quad (9)$$

Теперь задача оптимального управления процессом сбережения электроэнергии имеет вид: найти наборы (X_{ij}) и (X_{jk}) , минимизирующие (9) и удовлетворяющие ограничениям (1), (3), (6), (8).

Таким образом, получена трехиндексная распределительная задача линейного программирования с аксиальными ограничениями [4-8]. Распределительный характер ограничений делает эту задачу нетривиальной.

Решение задачи

Возможное некоторое упрощение задачи состоит в следующем. Поскольку оптимальный набор (X_{jk}) не зависит от набора (X_{ij}) , то сформулированная задача может быть расчленена на две подзадачи.

Подзадача 1. Найти набор (X_{ij}) , минимизирующий (4) и удовлетворяющий (1), (3).

Подзадача 2. Найти набор (X_{jk}) , минимизирующий (7) и удовлетворяющий (6), (8).

Обе подзадачи – распределительные, но могут быть преобразованы к транспортным с использованием приема, который опишем на примере подзадачи 1.

Введем переменную $Z_{ij} = P_i X_{ij}$, $i = 1, 2, \dots, m$, $j = 1, 2, \dots, n$. Тогда ограничение (1) имеет вид

$$\sum_{i=1}^m Z_{ij} \leq B_j, \quad j = 1, 2, \dots, n. \quad (10)$$

Преобразуем ограничение (3):

$$\sum_{j=1}^n X_{ij} = \sum_{j=1}^n \frac{Z_{ij}}{P_i} = \frac{1}{P_i} \sum_{j=1}^n Z_{ij} = T_i,$$

откуда

$$\sum_{j=1}^n Z_{ij} = P_i T_i = \mathcal{E}_i, \quad i = 1, 2, \dots, m. \quad (11)$$

Параметр \mathcal{E}_i имеет ясный смысл: это энергия, отдаваемая i -м источником за время T_i .

Наконец, подставляя новую переменную в (4), получим

$$S = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n C_{ij} X_{ij} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \frac{Z_{ij}}{P_i} X_{ij} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n d_{ij} X_{ij}. \quad (12)$$

Теперь задача поиска набора (Z_{ij}) , минимизирующего (12) и удовлетворяющего (10), (11), имеет стандартную структуру, типичную для транспортных задач [10-11]. Аналогично выполняется преобразование для подзадачи 2.

Рассмотрим частный пример. Необходимо решить задачу распределения электроэнергии между гидроэлектростанциями (ГЭС) и Облэнерго, учитывая неравномерное потребление электроэнергии в течение суток. Основная задача состоит в рациональном распределении электроэнергии именно ночью, когда потребление электроэнергии крайне мало. Для хранения и накопления электроэнергии в задаче используются гидроаккумулирующие электростанции (ГАЭС).

Таким образом, исходная задача распределения электроэнергии между ГЭС (поставщиками) и Облэнерго (потребителями) приобретает новый вид. Задача состоит в поиске оптимального плана распределения электроэнергии между ГЭС (поставщиками) – ГАЭС (промежуточными центрами) – Облэнерго (потребителями).

Эту задачу в соответствии с описанной методикой разобьем на две транспортные подзадачи. Первая состоит из определения оптимального плана распределения электроэнергии между ГЭС и ГАЭС, а вторая задача – найти оптимальный план распределения перевозок для пары ГАЭС-Облэнерго, учитывая при этом ограничения в мощности генерирующих электростанций и потребности Облэнерго в электроэнергии.

Критерий эффективности распределения по сравнению с равномерным распределением составляет:

$$\eta = \frac{S_1^0 + S_2^0}{S_1^* + S_2^*} = 1,21,$$

где в числителе стоят суммарные потери при передаче электроэнергии от источников к потребителям при равномерном распределении, а в знаменателе – суммарные потери при передаче электроэнергии от источников к потребителям, полученные после применения разработанной методики.

Выводы. В статье рассмотрена задача рационального использования суточного потребления электроэнергии. Задача сведена к распре-

делительной трехиндексной транспортной задаче с аксиальными ограничениями. В работе предложено упрощение полученной задачи, которое сводит исходную задачу к совокупности двух подзадач. Также предложен метод сведения распределительной задачи к транспортной.

Список использованных источников

1. **Воротницький В.Е.** Про принципи нормування технологічної витрати електроенергії на її транспортування в електричних мережах для розрахунку тарифів по діапазонах напруги /В.Э. Воротницкий, В.И. Эдельман, Н.А. Брорская // Доповіді міжнародного науково-технічного семінару «Сучасні методи і засоби розрахунку, нормування і зниження технічних і комерційних втрат електроенергії в електричних мережах». М. : 2002.
2. **Коваль В.М.** Нормування технологічних витрат електроенергії на передачу після електричних втрат /В.М. Коваль, В.С. Наумчик // Методичні аспекти, програмне забезпечення та аналіз практики розроблення нормативних характеристик// Новини енергетики.-К.-2001. – №7.
3. **Овсянников І.В.** Методи енергоресурсозбереження і підвищення енергоефективності в технологічному процесі транспортування електроенергії / И.В. Овсянников, С.О. Хомутив, А.О. Жигалин // Збірка статей II міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні проблеми електроенергетики». – Алтай. – 2014 – с.224.
4. **Blank M.** Ergodic properties of a simple deterministic traffic flow model // J. Stat. Phys. 2003. V. 111. P. 903-930.
5. **Николайчук В.Е.** Логістика у сфері розподілу / В.Е. Николайчук – Донецьк, 2000. – 210с.
6. **Габасов Р.Ф.** Методи лінійного програмування. Частина 2. Транспортні завдання. / Р.Ф. Габасов, Ф.М. Кірілова. – М.:Либроком, 2010. – 240 с.
7. **Gass S.I.** Linear programming: methods and applications. / S.I. Gass – N.Y.: McGraw – Hill, 1985.
8. **Раскин Л.Г.** Багатоіндексні завдання лінійного програмування / Л.Г. Раскин, І.О. Кириченко – М., 1982. – 240 с.
9. **Дунаєвська О.І.** Трьохіндексне завдання управління процесом транспортування електроенергії з проміжними центрами / Л.Г. Раскин, О.В. Сіра, О.І. Дунаевская // Тези доповідей XX міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (MicroCad – 2013). – Харків. – 2013 – с. 256.
10. **Дунаєвська О.І.** Багатоіндексні нелінійні транспортні завдання / О.В. Сіра, О.І. Дунаевська // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – Харків: ІКСЗТ, 2009. – № 5. – С. 25 – 30.
11. **Дунаєвська О.І.** Нелінійні завдання математичного програмування транспортного типу з нечіткими початковими даними / О.В. Сіра, Т.І. Каткова, О.І. Дунаевська // Системи управління, навігації та зв'язку. – Київ, Центральний науково-дослідний інститут навігації та управління. – Вип. 1 (21). – 2012. – С. 78 – 80.
12. **Ахієзер О.Б.** Моделювання залежності електроспоживання від тимчасового чинника / О.Б. Ахієзер, Р.С. Певний, Є.Л. Піротті // Системи обробки інформації. – Харківський національний університет Повітряних сил імені Івана Кожедуба. – Вип. 2. – 2013. – с. 2 – 5.